Defensa estratégica y armas de energía dirigida

Los copresidentes del grupo de especialistas de la Sociedad Americana de Física resumen su informe técnico sobre la aplicación de nuevos armamentos en la defensa estratégica

C. Kumar N. Patel y Nicolaas Bloembergen

En noviembre de 1983, unos ocho meses después de que el presidente Reagan emplazara a la comunidad científica estadounidense a colaborar en el desarrollo de un sistema "que intercepte y destruya los misiles balísticos intercontinentales antes de que lleguen a nuestro suelo", la Sociedad Americana de Física encargó un estudio que evaluara el estado actual de las armas de energía dirigida. Publicado por fin la pasada primavera, el trabajo se centra en el análisis de la apliación de láseres y haces de partículas en la defensa estratégica. El comité, formado por 17 miembros y presidido por los autores, se propuso elaborar un informe que sirviera como punto de referencia técnica en posteriores debates sobre la viabilidad de la "coraza espacial" imaginada por los impulsores de la Iniciativa de Defensa Estratégica (IDE), programa nacido a instancias del presidente norteamericano. El presente artículo se basa en tal informe.

Los miembros de la comisión se seleccionaron en razón de su experiencia en los campos científicos y técnicos de mayor interés para las armas de energía dirigida. Procedían de numerosos laboratorios universitarios, públicos o privados, y muchos de ellos participan de forma activa en el desarrollo de armamento nuclear o de las tecnologías en las que se apoya. En la prepararión de este estudio hemos tenido acceso a información confidencial. La publicación del informe se retrasó siete meses, por la revisión a que fue sometido por parte del Departamento de Defensa de los Estados Unidos, pese a lo cual el material eliminado ha sido mínimo. Las supresiones más significativas se refieren a la vulnerabilidad de los sistemas defensivos y a las posibles contramedidas.

¿Qué hemos encontrado? Comparadas con la extensión del informe (424 páginas) nuestras conclusiones son breves. Citando el propio trabajo: "Aunque en las últimas dos décadas se ha progresado considerablemente en muchas tecnologías AED [armas de energía dirigida], el Grupo de Estudio detecta lagunas importantes en el conocimiento científico e ingenieril de muchos aspectos asociados al desarrollo de esas tecnologías. Su resolución satisfactoria resulta decisiva para extrapolar hasta los niveles de rendimiento que exige todo sistema de defensa balístico eficaz. No se dispone hoy de información suficiente para decidir si tales extrapolaciones pueden o no alcanzarse. La mayoría de los componentes principales del sistema AED deben mejorarse varios órdenes de magnitud. Dada la interrelación de los diversos componentes, las mejoras han de efectuarse manteniendo la coherencia mutua. Estimamos que, incluso en la mejor de las circunstancias, la adquisición de los conocimientos técnicos necesarios para tomar una decisión informada sobre la eficacia potencial de los sistemas de armas de energía dirigida requerirá,

Informe del grupo de estudio de la Sociedad Americana de Física sobre "Ciencia y Tecnología de las Armas de Energía Dirigida"

Nicolaas Bloembergen, *copresidente*, Universidad de Harvard
C. Kumar N. Patel, *copresidente*, Laboratorios AT&T Bell
Petras Avizonis, Laboratorio de Armamento de las Fuerzas Aéreas de los Estados Unidos
Robert Clem, Laboratorios Nacionales Sandia
Abraham Herzberg, Universidad de Washington
Thomas Johnson, Academia Militar de los Estados Unidos
Thomas Marshall, Universidad de Columbia
Bruce Miller, Laboratorios Nacionales Sandia
Walter Morrow, Laboratorios Lincoln, Instituto de Tecnología de Massachusetts
Edwin Salpeter, Universidad de Cornell
Andrew Sessler, Laboratorio Lawrence Berkeley
Jeremiah Sullivan, Universidad de Illinois
James Wyant, Universidad de Arizona
Amnon Yariv, Instituto de Tecnología de California
Richard Zare, Universidad de Stanford

L. Charles Hebel, Xerox Corporation
Alex Glass, KMS Fusion, Inc.

La historia del estudio es larga. Encargado el 20 de noviembre de1983 por la Sociedad Americana de Física (APS), no se publicó hasta unos 21 meses después ("el período de gestación de un elefante", en palabras de Patel), el 24 de abril de 1987. Los últimos siete meses los invirtió el Departamento de Defensa norteamericano en la revisión del mismo para que no dañara la seguridad nacional.

cuando menos, una década de investigación intensa. Además, la integración global del sistema y su efectividad dependen de modo decisivo de datos que, hasta donde sabemos, no se han obtenido todavía."

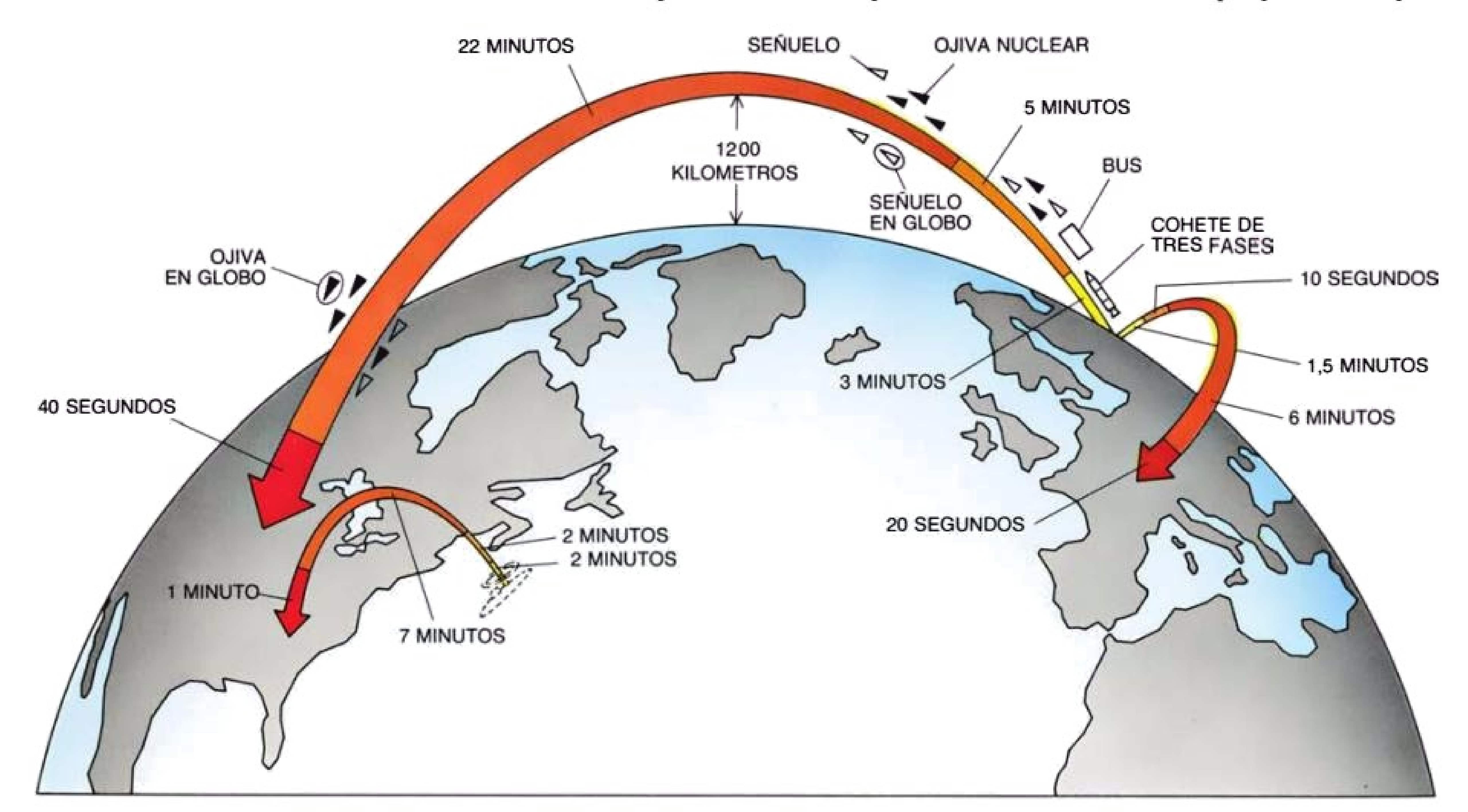
El estudio se centró en las armas de energía dirigida, porque esos ingenios se requerirán en casi todas las fases de la destrucción de un misil: la detección del lanzamiento, la localización y el seguimiento del blanco, la distinción entre ojivas nucleares y señuelos, la propia destrucción del objetivo y la verificación de la misma. El estudio no consideró explícitamente la otra clase principal de armas, las de agresión cinética: cañones químicos (cohetes) y cañones electromagnéticos. Los sistemas de defensa contra misiles balísticos que confíen a las armas cinéticas la destrucción de un blanco deberán también aprovechar las tecnologías de las armas de energía dirigida, para cumplir las misiones citadas antes. Por su naturaleza, todo sistema de defensa contra misiles balísticos depende en gran medida de la disponibilidad de una tecnología de armas de energía dirigida que haya alcanzado la suficiente madurez.

Nuestro análisis no se detiene en puntos tan significativos como son el mando, el control, las comunicaciones y los servicios de información (que reciben la denominación global de C^3I, por *command, control, communication and intelligence*), ni examina el soporte físico informático, la creación de programas, la seguridad del control de la batalla ni la complejidad de los sistemas en su conjunto. Otros apartados cuya importancia se reconoce pero que no se tuvieron en consideración fueron el potencial humano necesario, los costes y la relación coste/eficacia, el control armamentístico y la estabilidad estratégica, así como las implicaciones políticas internacionales y locales. Muchos de esos temas han sido objeto de enconados debates desde la fecha del anuncio presidencial del programa vulgarmente conocido por "Guerra de las galaxias"; sin embargo, sorprende que el único aspecto que no se haya analizado con suficiente objetividad y detalle sea precisamente el de la tecnología implicada.

La eficacia de cualquier defensa contra misiles balísticos depende de la exacta valoración que se haga de las cuatro fases del vuelo del misil: lanzamiento, postlanzamiento, fase intermedia y reentrada. La fase de lanzamiento empieza cuando el misil abandona la rampa y termina cuando la carga se separa del cohete propulsor. Suele durar unos tres minutos. Durante una fase de postlanzamiento típica, el "bus", o vehículo de postlanzamiento, dispara varios misiles más pequeños, los vehículos de reentrada (denominados también MIRV, por *multiple independent reentry vehicles*), y se encienden sus impulsores, que dirigen a cada uno hacia su blanco. A menudo se engloban ambas fases en una sola, pero las hemos mantenido separadas porque señalan distintas pautas a la defensa.

La fase más larga es la intermedia. Durante la misma, los vehículos de reentrada y los señuelos avanzan, juntos, en trayectorias sin apenas rozamiento muy por encima de la atmósfera. Suele durar unos 20 minutos en vuelos intercontinentales. Finalmente, los vehículos de reentrada penetran de nuevo en la atmósfera y en menos de 60 segundos alcanzan el suelo.

Las mejores ocasiones para desbaratar el ataque enemigo se presentan probablemente en las fases de lanzamiento y de postlanzamiento. Por varias razones, las armas de energía dirigida no desempeñan un papel especial en la fase final de reentrada. A la ventaja que supone el largo tiempo que se invierte en la fase intermedia se opone el incremento del número de objetos amenazadores (vehículos de reentrada y señuelos) respecto de las dos fases iniciales. En efecto, dado el número y la capacidad actual de las rampas soviéticas, se estima que podrían desple-



1. LAS CUATRO FASES del vuelo de un misil balístico intercontinental (ICBM), de un misil lanzado desde un submarino y de un misil de alcance intermedio. La primera fase, la de lanzamiento (*amarillo*), empieza cuando el misil abandona las rampas de lanzamiento y termina cuando la carga se separa del vehículo propulsor. Durante el postlanzamiento (*naranja claro*) un "bus", o vehículo de postlanzamiento, dispara pequeños misiles: vehículos de reentrada. En la fase intermedia (*naranja oscuro*) los vehículos de reentrada y los señuelos se mueven en trayectorias próximas. El vuelo termina con la fase de reentrada (*rojo*). Ante el gran número de blancos de la fase intermedia, las mejores ocasiones para frustar un ataque enemigo se dan durante el lanzamiento y postlanzamiento.

garse alrededor de medio millón o más de objetos amenazadores. Aun cuando una defensa contra la fase de lanzamiento alcanzara una eficacia del 80 por ciento, llegarían a la fase intermedia más de 100.000 objetos. El seguimiento de decenas o centenares de miles de objetos y su cabal discernimiento supondrían un formidable reto para los sensores y los ordenadores de control del combate.

Entre las armas para la fase de lanzamiento se están tomando en consideración cuatro tipos de láseres: los químicos, de excímeros, de electrones libres y de rayos X. Los haces que producen todos ellos viajan a la velocidad de la luz, lo cual significa que, a efectos operativos, se puede alcanzar cualquier blanco instantáneamente. Los láseres químicos, cuya tecnología es la que se encuentra más desarrollada, generan radiación por medio de reacciones químicas entre dos gases, como el hidrógeno y el flúor, o el deuterio ("hidrógeno pesado") y el flúor. Su producción es continua, y se han medido potencias de salida de esos láseres superiores a un megawatt (10^6 watt); un láser con un haz de 10 kilowatt puede cortar en pocos segundos una plancha de acero de medio centímetro de espesor.

En nuestra opinión, y pese a la impresionante potencia de los láseres químicos y a la gran calidad de sus haces, las más simples aplicaciones en defensa estratégica exigirían un incremento de los niveles de potencia actuales en un factor 20, como mínimo, y ello manteniendo el haz sin distorsión y reduciendo al mínimo su divergencia. Las distancias habituales entre el blanco y el láser obligarían a un aumento adicional de la potencia en un factor de cuatro. La arquitectura del láser químico que ha alcanzado el nivel de potencia del megawatt no se considera adaptable a la obtención de potencias mayores; deberá llegarse a éstas con diseños que aún no se han explorado. Por tanto, se ignora si el láser químico logrará ofrecer las potencias requeridas.

2. TRAZADOR LASER, diseñado para el seguimiento de objetos en vuelo y para apuntar en ellos un haz de luz láser. El instrumento de la fotografía forma parte del láser químico que emite en el infrarrojo intermedio (MIRACL). Los láseres químicos generan el haz por reacción entre gases, en este caso hidrógeno y flúor.

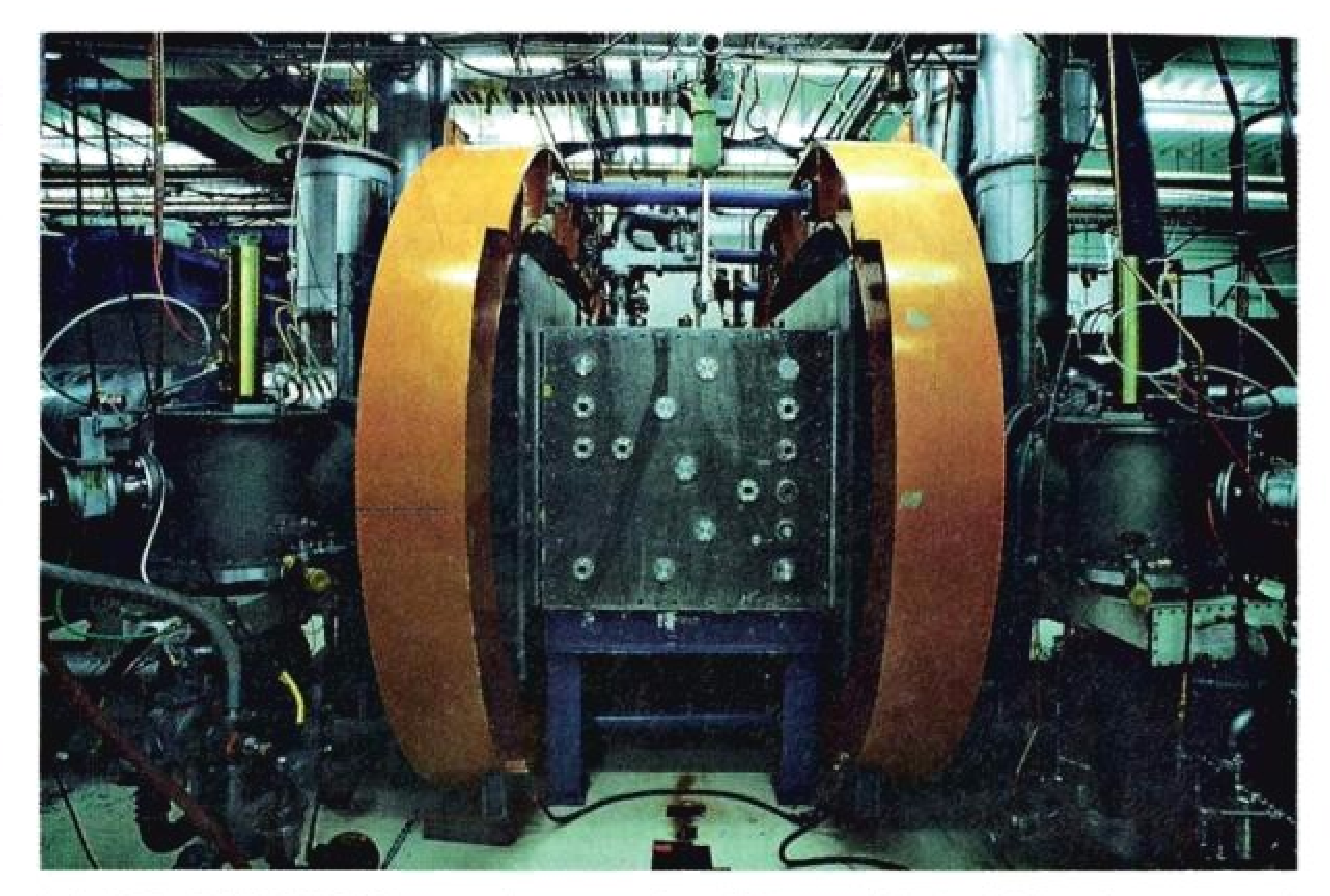
Por otra parte, la longitud de onda de la luz que emite el láser de hidrógeno-flúor (2,8 micrometros, o millonésimas de metro) la absorbe la atmósfera. Así, los láseres de esas características deberían situarse en el espacio, lo cual obligaría a considerar los problemas que plantearía las vibraciones y el desecho del combustible usado. Por el contrario, la atmósfera es virtualmente transparente a los haces de los láseres químicos de deuterio-flúor y de iodo atómico, que tienen longitudes de onda de 3,8 y 1,3 micrometros, respectivamente. De satisfacerse los requerimientos de potencia, esos láseres podrían instalarse en una base terrestre. Conviene, asimismo, recordar que los láseres de oxígeno deberían aumentar su capacidad actual al menos en cinco órdenes de magnitud (es decir, en un factor de 100.000).

Los láseres de excímeros constituyen el segundo tipo de esas emisiones cuya aplicación a las armas de energía dirigida es objeto de estudio. Los excímeros son dímeros excitados, es decir, compuestos inestables de dos moléculas. Una descarga eléctrica excita las moléculas hasta formar una molécula dimérica con enlace iónico. El dímero emite radiación y se disocia. Los láseres de ese tipo generan luz en forma de pulsos cortos. Entre los láseres de excímeros más potentes se cuenta el de kriptón-flúor que se está desarrollando en el Laboratorio Nacional estadounidense de Los Alamos. Emiten en una longitud de onda de 25 micrometros y ofrecen el inconveniente de su escasa transmisión atmosférica, comparada con la de la luz visible o la de algunos láseres que operan en el infrarrojo. En los láseres de excímeros de mayor interés, la pobreza de su transmisión no se debe a la absorción, sino a la difusión producida por moléculas atmosféricas. (Ese tipo de difusión, conocida como de Rayleigh, crece como la inversa de la cuarta potencia de la longitud de onda de la radiación.) La conmutación de la longitud de onda del láser en otras longitudes de onda mayores, por medio de la técnica de dispersión Raman, mengua la gravedad del problema.

En nuestra opinión, los láseres de excímeros instalados en tierra y destinados a la defensa estratégica deben generar cuando menos 100 megajoule de energía por pulso, o por cada serie de pulsos de duración total comprendida entre uno y varios centenares de microsegundos. Los láseres de excímeros actuales generan unos 10 kilojoule de energía en pulsos que duran alrededor

de un microsegundo; por tanto, hay que aumentar la energía en un mínimo de cuatro órdenes de magnitud. Podría salvarse esa distancia combinando muchos láseres, pero queda por demostrar la viabilidad de tal sistema.

El tercer tipo de láser en fase de desarrollo que podría encontrar aplicación en la defensa contra misiles balísticos es el de electrones libres. Su modo de operación se basa en enviar un haz de electrones a través de una serie de imanes móviles; éstos provocan la vibración de los electrones y su consiguiente emisión de radiación. Variando la distancia entre los imanes o la energía de los electrones, la radiación puede, en teoría, sintonizarse en cualquier longitud de onda. En aplicaciones de defensa contra misiles balísticos, debería dotarse a los láseres de electrones libres con base terrestre de una potencia promedio mínima de un gigawatt (mil millones de watt) a una longitud de onda de un micrometro; esa radiación atravesaría la atmósfera con facilidad.



3. LASER DE EXCIMEROS que se está construyendo en el Laboratorio Nacional de Los Alamos; generará luz en forma de pulsos rápidos. El término excímero deriva de la expresión "dímero excitado", es decir, compuesto inestable formado por dos moléculas. Una descarga eléctrica excita la formación de una molécula dímera ligada iónicamente. El dímero emite radiación y se disocia. En este caso el excímero es de kriptón-flúor. Los imanes ovales aseguran que la descarga eléctrica (de un haz de electrones) se deposite homogéneamente en el gas de kriptón-flúor. El haz láser oscila hacia dentro y fuera del plano de la fotografía.

Se han conseguido potencias máximas de aproximadamente un megawatt a una longitud de onda de un micrometro; con radiación de ocho milímetros de longitud de onda (que absorbe la atmósfera) se han alcanzado potencias máximas de hasta un gigawatt. La consecución de potencias elevadas a cortas longitudes de onda constituye un arduo problema técnico. La hipotética construcción de láseres de electrones libres de gran potencia y óptimo rendimiento que operasen con radiación de un micrometro depende fundamentalmente de la corroboración experimental de varios conceptos físicos confinados todavía en el reino de la especulación teórica.

Quizás el más exótico de los láseres en período de desarrollo sea el de rayos X. Consta de un explosivo nuclear rodeado de un conjunto cilindriforme de fibras metálicas. Los rayos X emitidos durante la explosión nuclear estimulan la emisión de un haz de rayos X por parte de las fibras durante el breve intervalo de tiempo que precede a la autodestrucción del dispositivo. Se ha ensayado ya el ingenio en pruebas subterráneas, pero su hipotética utilidad militar sigue siendo incierta. La absorción de los rayos X en la atmósfera obliga a situar esos artefactos a más de 80 kilómetros de altura, quizás mediante algún ingenio de despliegue inmediato. Por otra parte, debe hallarse el modo de enfocar y guiar los haces de rayos X hacia sus blancos. Asimismo, antes de evaluar la aplicación militar de los láseres de rayos X generados por explosiones nucleares, habrá que confirmar muchas hipótesis físicas.

Concedamos el supuesto de que se logra construir láseres dotados de potencia suficiente para su aplicación en la defensa estratégica; permanecerían por resolver obstáculos formidables antes de que los haces abatieran los objetivos asignados. En primer lugar, todo haz de luz láser, cualquiera que sea su intensidad y su grado de colimación, se difracta, es decir, se extiende y pierde intensidad, en su viaje por el espacio. Para un láser de una potencia determinada, la intensidad del haz que llega al blanco es proporcional al cuadrado del diámetro del espejo con que se enfoca el haz, e inversamente proporcional al cuadrado del producto de la longitud de onda del láser y de la distancia al blanco. En consecuencia, para mantener la intensidad deseada en el blanco, cuanto mayor sea la longitud de onda o el alcance, mayor deberá ser el diámetro del espejo.

Los mayores espejos operativos en tareas de guía y enfoque tienen diámetros de unos ocho metros; sin embargo, las misiones de defensa estratégica exigirán el uso de espejos de diámetros comprendidos entre los 10 y 40 metros, tamaños eficaces que podrían alcanzarse mediante el empleo conjunto de varios espejos pequeños, en vez de uno solo y mayor. La acción de los espejos se coordinaría mediante dispositivos electrónicos. Hoy pueden controlarse varios centenares de esos dispositivos a la vez, pero se ignora si podrán someterse a control simultáneamente los 10.000 o 100.000 necesarios para las misiones de defensa. Además, la disposición de los espejos obliga a aplicar técnicas de corrección de fase, en virtud de las cuales se alinean con extremada precisión las "crestas" y los "valles" de las ondas del haz. Está por demostrar que esas técnicas puedan aplicarse en los intensos haces que necesita la defensa estratégica. Se encuentra en fase de desarrollo teórico una solución alternativa; consistiría ésta en utilizar membrana flexible y única, de gran tamaño.

Los espejos de cualquier sistema láser resultarían vulnerables a la radiación de otros láseres, en particular si los espejos forman parte de un sistema desplegado en el espacio. Láseres de potencia relativamente débil podrían causar daños de importancia en el revestimiento del espejo si sus longitudes de onda difirieran de la que, por diseño, está preparado para reflejar. También dañarían el revestimiento del espejo las partículas energéticas de los rayos cósmicos. Los espejos de tamaño pequeño deberían refrigerarse, para impedir que los deteriorara el propio haz del láser.

Los láseres instalados en tierra, como el de electrones libres o el de excímeros, aventajan a los alojados en el



4. LASER DE ELECTRONES LIBRES, el denominado PALLADIN. Emite en la banda infrarroja del espectro electromagnético. Se acelera un haz de electrones hasta energías de 50 millones de electronvolt (MeV); los electrones atraviesan entonces la serie de imanes que se muestra, que les hace vibrar y emitir radiación.

espacio en que el peso, la potencia y el abastecimiento no constituyen problemas de mayor importancia. Sin embargo, también los primeros dependerían de elementos ópticos instalados en plataformas espaciales; en efecto, para alcanzar desde bases terrestres estadounidenses los objetivos situados más allá de la línea del horizonte, debería reflejarse imprescindiblemente en ellos la radiación láser. Por otra parte, las turbulencias atmosféricas degradan la calidad del haz. En ese sentido se está analizando una técnica, denominada de conjugación de fase óptica, que habría de compensar los efectos de las turbulencias: se mide la distorsión que causa la atmósfera sobre un láser señalizador de poca potencia emitido desde la plataforma espacial donde se halla ubicado el espejo y se imprime esa información en el haz láser de gran potencia instalado en tierra, de tal forma que éste queda "predistorsionado" y emerge de la atmósfera con su calidad primigenia. Se ha comprobado la técnica con potencias pequeñas, pero ha de adaptarse aún a potencias mayores. Además, el número de dispositivos necesarios para deformar el espejo que genera la predistorsión del haz debe aumentarse en dos órdenes de magnitud.

Durante la actuación de un láser pulsante (como el de excímeros), el campo óptico asociado con el trayecto descendente desde el espejo hasta el objetivo sería muy intenso; tanto, que su intensidad bastaría para dispersar el haz láser (por efecto de la denominada dispersión Raman) en altitudes inferiores a los 80 kilómetros. El fenómeno cambia la longitud de onda de la radiación (lo cual no resulta de mayor importancia) y reduce la potencia disponible para el ataque contra el objetivo.

Finalmente, los sistemas láser de base terrestre deberían instalarse en distintos emplazamientos, separados centenares de kilómetros para evitar que las condiciones meteorológicas adversas, la cobertura nubosa, por ejemplo, inmovilicen las baterías de defensa. A su vez, en cada instalación habría que duplicar algunos de los grandes espejos telescópicos, separándolos varios kilómetros para evitar las coberturas nubosas locales.

La otra clase de armas de energía dirigida que interesa en la defensa contra misiles balísticos abarca a las que utilizan haces de partículas, con carga eléctrica o neutras. La mayoría de los haces de partículas están formados por electrones de gran energía. Estimamos que, en aplicaciones de intercepción, el voltaje del acelerador debería incrementarse al menos en un orden de magnitud, en dos la duración del pulso y al menos en tres órdenes de magnitud la potencia promedio. La capacidad de distinguir entre objetivos y señuelos requeriría un aumento de la duración del pulso de dos órdenes de magnitud, como mínimo, y de dos órdenes de magnitud de la potencia promedio.

La utilización de haces de partículas cargadas ha de hacer frente a una limitación: el campo magnético terrestre curva los haces. Además, tienden a "volatilizarse", es decir, a que las fuerzas de repulsión que actúan entre las partículas cargadas del mismo signo los inestabilicen. Se ha intentado compensar ambos efectos con la ayuda de haces láser. Se trataría de crear un canal de gas ionizado que sirviera de guía para los electrones de gran energía que forman el haz, igual que las fibras ópticas conducen los haces de luz. El mecanismo de guía ha funcionado en pruebas de laboratorio en distancias de 95 metros; en aplicaciones de defensa contra misiles balísticos debería cubrir 1000 kilómetros. El procedimiento no podría utilizarse en aquellas altitudes donde, si bien escasea mucho el gas a ionizar, resultan aún perceptibles los efectos del campo magnético terrestre. Por otra parte, a pequeñas altitudes, la gran densidad del gas provoca inestabilidades en el haz.

Se investiga también el desarrollo de haces de partículas neutras, a las que no afectan los campos magnéticos. Para generar un haz neutro se acelera otro de iones negativos (átomos que tienen un electrón en exceso) hasta que alcanza la energía requerida, se dirige, se le enfoca y se le quitan entonces los electrones de más. De acuerdo con nuestros cálculos, hay que incrementar, al menos en dos órdenes de magnitud, el potencial y el ritmo de emisión del haz de los actuales aceleradores de haces de partículas neutras. También deben mejorar notablemente la puntería y el ritmo con que puede reasig-

narse objetivos a los dispositivos. Los haces de partículas neutras presentan, además, otro inconveniente: interactúan intensamente con cualquier materia. A bajas altitudes, donde la densidad de gases es importante, la atmósfera arranca de las partículas neutras sus electrones más externos; el haz de partículas neutras se convertiría entonces en un haz de partículas cargado y adolecería de sus limitaciones. Los dispositivos de haces de partículas neutras deberían instalarse, pues, en el espacio.

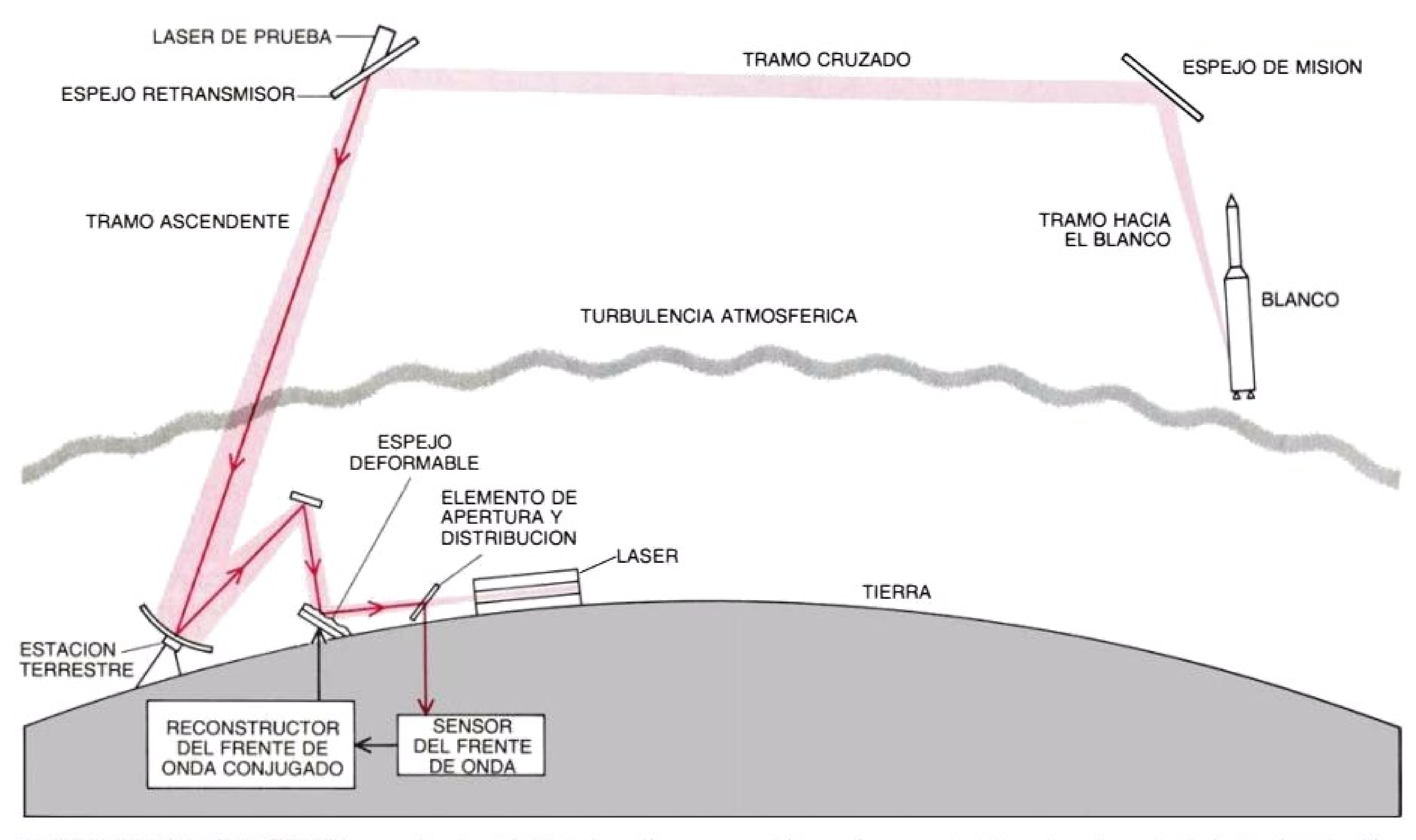
Dejemos de lado la forma en que los sistemas de defensa estratégica han de abatir los misiles. La eficacia de los mismos –entendiendo por tales los láseres, haces de partículas, cápsulas espaciales o armas electromagnéticas– no puede superar a su propia capacidad de detectar y seguir los objetivos asignados. Por ejemplo, para asegurar la destrucción del 90 por ciento de los misiles atacantes durante las fases de lanzamiento y postlanzamiento, han de detectarse bastante más del 90 por ciento de esos ingenios. Además, el seguimiento y destrucción de un blanco durante la fase intermedia dependen del conocimiento exacto de su trayectoria durante la fase de lanzamiento. Casi más importante aún resulta mantener baja la incidencia de falsas alarmas de la defensa contra misiles balísticos, para que no se active ésta en tiempo de paz.

Durante la fase de lanzamiento, el misil se localiza por la intensa radiación infrarroja que emite el penacho de gases que salen por las toberas de los propulsores del ingenio. La posición del misil dentro del penacho depende de la altitud, el tipo de misil y las características del propulsor y del combustible. Por tanto, la localización del misil puede variar por motivos imprevisibles para la defensa. El seguimiento infrarrojo de los penachos de los misiles ha de completarse con otros medios que aseguren la precisión que requieren las armas de energía dirigida.

También plantea problemas el seguimiento durante las fases de postlanzamiento e intermedia. Las señales térmicas que se producen en la fase de postlanzamiento y por parte de los vehículos de reentrada son muy débiles: habrá que sumar, pues, a los detectores térmicos, radares de microondas u ópticos. Se precisaría entonces un gran número de plataformas espaciales dotadas de esos sensores, y también, quizá, de detectores que efectuaran el seguimiento durante la fase de lanzamiento.

En la fase intermedia, la defensa debe superar otro obstáculo: distinguir entre los vehículos de reentrada y los señuelos, que aparecerán en gran número para confundir o saturar los detectores defensivos. Las tecnologías de energía dirigida posibilitan la identificación de los señuelos. Los haces de partículas penetran profundamente en todo tipo de materiales; por ejemplo, un haz de hidrógeno neutro de entre 100 y 400 millones de electronvolt (MeV) de energía penetra hasta 40 centímetros en el aluminio. Por consiguiente, los haces de partículas dirigidos hacia los objetivos podrían muestrear su contenido y, aprovechando las emisiones del interior, determinar si se trata o no de una añagaza. Esa labor requeriría la participación de muchas plataformas espaciales capaces de operar en ambientes fuertemente contaminados de radiación nuclear. Las aplicaciones de discriminación se encuentran actualmente en fase de desarrollo teórico y en los primeros estadios experimentales.

Cualquier sistema de defensa estratégica que utilice armas de energía di-



5. TURBULENCIA ATMOSFERICA, que reduce la calidad de los haces láser, y cuya incidencia podría compensarse mediante dispositivos ópticos adaptables, en este caso un espejo deformable controlado por ordenador. La señal de un haz láser débil dirigida desde un espejo retransmisor hacia la base terrestre informa al sensor de frente de onda sobre la naturaleza y la magnitud de la turbulencia atmosférica. Un ordenador dirige entonces electrónicamente los dispositivos que deforman los segmentos del espejo; así, se emite desde el suelo un haz láser dotado de la "distorsión conjugada": al propagarse por la atmósfera, la distorsión se "contrarresta" y el haz llega al espejo retransmisor sin distorsión, es decir, en su calidad de origen. Aunque pueden controlarse ya varios centenares de esos dispositivos a la vez, se ignora si podrán dominarse simultáneamente los 10.000 o 100.000 dispositivos requeridos por las aplicaciones de defensa.

rigida consumirá importantes cantidades de energía. Para satisfacer sus funciones de mantenimiento –control de la altitud, refrigeración de los espejos, recepción y emisión de la información y funcionamiento de los radares– las plataformas espaciales deberán disponer de una potencia continua de entre 100 y 700 kilowatt. Al no existir proyectos concretos de esas estaciones, los requerimientos que hemos citado sólo pueden considerarse fiables en un factor dos. En cualquier caso, tal potencia sólo puede ofrecerla de un modo eficaz un reactor nuclear. Cada plataforma necesitaría su propio reactor, por lo que habría que desplegar en el espacio 100 o más reactores. Cubrir esos objetivos significa resolver muchos e importantes problemas de ingeniería que ni siquiera han empezado aún a explorarse; por ejemplo, la refrigeración de grandes reactores nucleares instalados en el espacio.

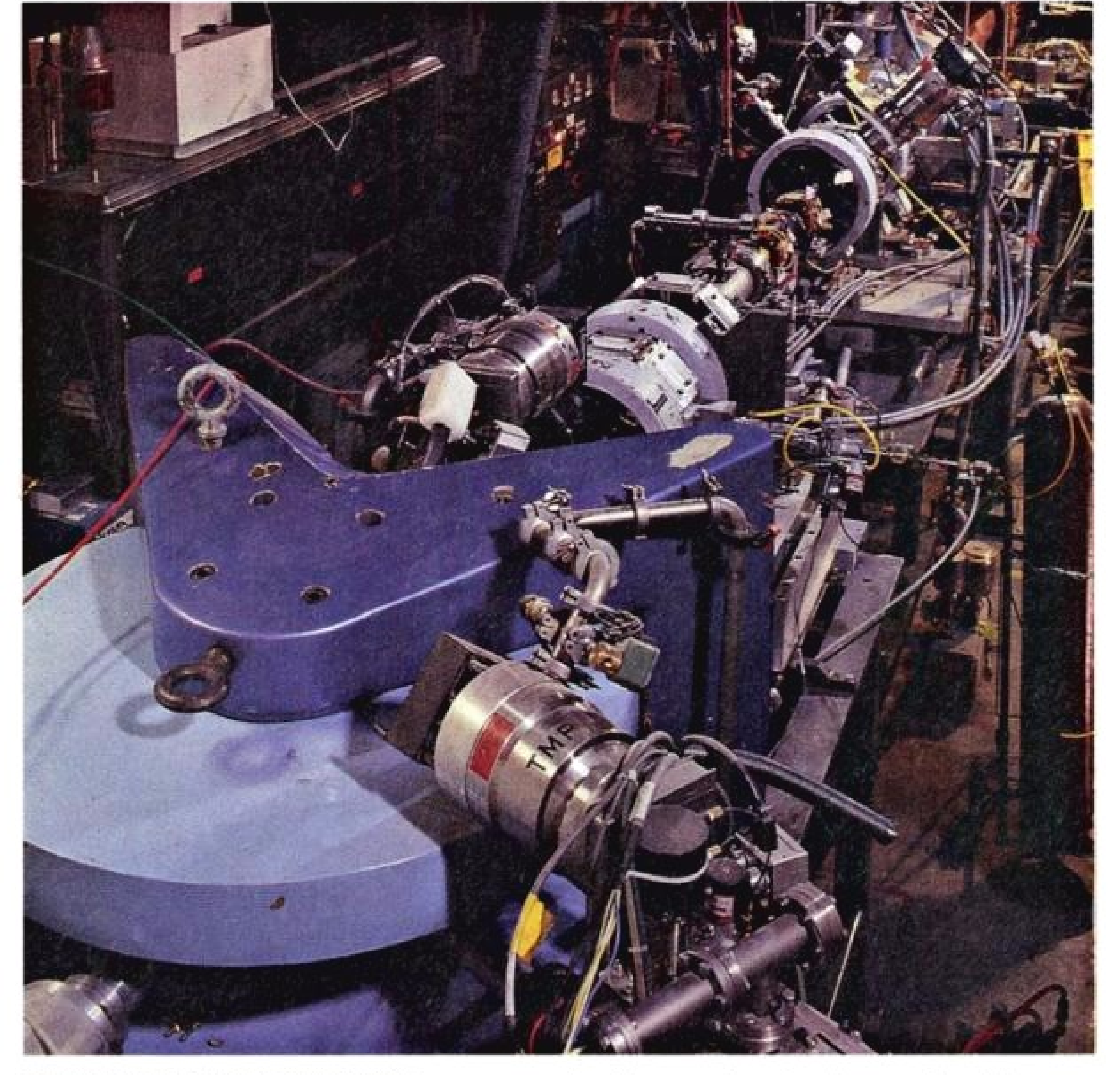
Las necesidades energéticas durante una intervención en combate real oscilarían entre los 100 megawatt y un gigawatt a lo largo de períodos de varios centenares de segundos, en función del tipo de arma espacial de energía dirigida. La energía se obtendría de grandes motores químicos o nucleares, desplegados a bastante distancia de las plataformas espaciales para evitar perturbaciones mecánicas. De utilizarse motores químicos, el consumo de combustible sería superior a las cinco toneladas por minuto de operación de la plataforma. Sin duda, el sistema de transmisión de energía desde los motores hacia la plataforma sería complejo. Los requerimientos energéticos inaplazables de las armas de energía dirigida instaladas en el espacio presentan, por tanto, inconvenientes técnicos importantes.

Otra cuestión clave en cualquier sistema de defensa contra misiles balísticos es la relativa a su supervivencia. Las plataformas espaciales transportarían instrumentos muy delicados: sensores, espejos ópticos y discos de radar, que se deterioran con mayor facilidad que los propulsores y que los vehículos de reentrada. Aunque puede protegerse los sensores y los espejos ópticos durante los largos períodos de inactividad, esos elementos quedarían expuestos a sufrir daño en cuanto se pusieran en alerta previendo un ataque inminente. El sistema defensivo resultaría vulnerable al asalto de armas espaciales o terrestres y armas cinéticas. Su ensamblaje en el espacio constituiría uno de los momentos de mayor vulnerabilidad. La pervivencia de un sistema que utilice elementos alojados en el espacio resulta, pues, altamente cuestionable.

También plantea serios interrogantes la supervivencia de los silos terrestres. Habría que proteger las instalaciones del ataque de múltiples amenazas, incluidos los misiles crucero y el sabotaje. El reducido número de bases terrestres proyectadas, que deberían ser capaces de llevar a cabo, cada una de ellas, todas las misiones asignadas a las armas de energía dirigida, las convertiría en un preciado objetivo.

La seguridad de un sistema de ese tipo queda también en entredicho ante la comprobación siguiente: por débil que sea un arma de energía dirigida para utilizarla en la defensa contra misiles balísticos, puede resultar poderosísima para amenazar a los componentes espaciales del sistema defensivo. Las plataformas espaciales se mueven en órbitas conocidas, o lo que es lo mismo, pueden seguirse durante períodos muy superiores a los que se dispone para el rastreo de los lanzadores, buses y vehículos de reentrada. Las plataformas probablemente estén formadas por componentes más vulnerables que las lanzaderas y que los vehículos de reentrada. Asimismo, las plataformas espaciales dispuestas en órbitas bajas podrían atacarse con sistemas de menor alcance que los requeridos para las intercepciones en la fase de postlanzamiento. En particular, los láseres de rayos X impulsados por explosiones nucleares constituirían una amenaza de especial magnitud para la delicada operación de los sensores espaciales, electrónicos y ópticos.

Han de considerarse también cuestiones del entorno estratégico y táctico. El desarrollo y despliegue de una defensa eficaz contra misiles balísticos es tarea que ocuparía muchos años. Por tanto, el atacante dispondría de mucho tiempo para desarrollar contramedidas. Cualquier sistema defensivo deberá diseñarse para afrontar gran variedad de respuestas, y resulta verosímil que se despliegue alguna imprevista. Es probable, por tanto, que un sistema de energía dirigida diseñado para las amenazas de hoy se demuestre inadecuado para superar a las que se le enfrenten cuando sea desplegado.



6. HAZ DE PARTICULAS NEUTRAS; se genera en Los Alamos acelerando primero un haz de iones con carga negativa. El electrón sobrante se arranca en una celda de gas, obteniéndose un haz neutro. La cámara azul que aparece en el extremo final del acelerador se utiliza para medir la velocidad de las partículas.

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

DEFENSA ESTRATEGICA Y ARMAS DE ENERGIA DIRIGIDA

WEAPONS IN SPACE, VOL. 1: CONCEPTS AND TECHNOLOGIES. *Daedalus*, vol. 114, n.° 2; primavera, 1985. Vol. 2: IMPLICATIONS FOR SECURITY. *Daedalus*, vol. 114, n.° 3; verano, 1985.

THE STRATEGIC DEFENSE INITIATIVE: PERCEPTION VS REALITY. Wolfgang K. H. Panofsky en *Physics Today*, vol. 38, n.° 6, págs. 34-45; junio, 1985.

STRATEGIC DEFENSE INITIATIVE: THE POLITICS AND SCIENCE OF WEAPONS IN SPACE. Gerold Yonas en *Physics Today*, vol. 38, n.° 6, págs. 24-32; junio, 1985.

EL GRANDIOSO DESFILE DE LAS GALAXIAS

EVIDENCE FOR LOCAL ANISTROPY DE THE HUBBLE FLOW. Marc Davis y P. J. E. Peebles en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 21, págs. 109-130; 1983.

A DISTANCE SCALE FROM THE INFRARED MAGNITUDE/H I VELOCITY-WIDTH RELATION, V: DISTANCE MODULI TO 10 GALAXY CLUSTERS, AND POSITIVE DETECTION OF BULK SUPERCLUSTER MOTION TOWARD THE MICROWAVE ANISOTROPY. M. Aaronson, G. Bothun, J. Mould, J. Huchra, R. A. Schommer y M. E. Cornell en *The Astrophysical Journal*, vol. 302, 1.ª parte, n.° 2, págs. 536-563; 15 de marzo de 1986.

SPECTROSCOPY AND PHOTOMETRY OF ELLIPTICAL GALAXIES: A LARGE-SCALE STREAMING MOTION IN THE LOCAL UNIVERSE. Alan Dressler, S. M. Faber, David Burnstein, Roger L. Davies, Donald Lynden-Bell, R. J. Terlevich y Gary Wegner en *The Astrophysical Journal*, vol. 313, n.° 2, 2.ª parte, págs. L37-L42; 15 de febrero de 1987.

RETROTRANSCRIPCION

REPLICATION OF THE GENOME OF A HEPATITIS B-LIKE VIRUS BY REVERSE TRANSCRIPTION OF AN RNA INTERMEDIATE. J. Summers y W. S. Mason en *Cell*, vol. 29, n.° 2, págs. 403-415; junio, 1982.

TY ELEMENTS TRANSPOSE THROUGH AN RNA INTERMEDIATE. J. D. Boeke, D. J. Garfinkel, C. A. Styles y G. R. Fink en *Cell*, vol. 40, n.° 3, págs. 491-500; marzo, 1985.

THE MOLECULAR BIOLOGY OF HEPATITIS B VIRUSES. D. Ganem y H. E. Varmus en *Annual Review of Biochemistry*, volumen 56, páginas 651-693; 1987.

ELECTRUROS

CESIUM 18-CROWN-6 COMPOUNDS. A CRYSTALLINE CESIDE AND A CRYSTALLINE ELECTRIDE. Ahmed Ellaboudy, James L. Dye y Patrick B. Smith en *Journal of the American Chemical Society*, vol. 105, n.° 21, págs. 6490-6491; 19 de octubre de 1983.

PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF ALKALIDES AND ELECTRIDES. J. L. Dye y M. G. DeBacker en *Annual Review of Physical Chemistry*, vol. 38, págs. 271-301; 1987.

MIMETISMO VEGETAL

MIMICRY IN PLANTS. Delbert Wiens en *Evolutionary Biology*, vol. 11, págs. 365-403; 1978.

CROP MIMICRY IN WEEDS. Spencer C. H. Barrett en *Economic Botany*, vol. 37, n.° 3, págs. 255-282; julio-septiembre, 1983.

MIMICRY AND DECEPTION IN POLLINATION. A. Dafni en *Annual Review of Ecology and Systematics*, vol. 15, págs. 259-278; 1984.

CORREDOR SWAHILI

EARLY SEAFARERS OF THE COMORO ISLANDS: THE DEMBENI PHASE OF THE IXTH-XTH CENTURIES AD. Henry T. Wright en *Azania*, vol. 19, págs. 13-59; 1984.

THE SWAHILI: RECONSTRUCTING THE HISTORY AND LANGUAGE OF AN AFRICAN SOCIETY, 800-1500. Derek Nurse y Thomas Spear. University of Pennsylvania Press, 1985.

ASIATIC COLONISATION OF THE EAST AFRICAN COAST: THE MANDA EVIDENCE. Mark Horton en *Journal of the Royal Asiatic Society of Britain & Ireland*, n.° 2 para 1986, págs. 202-213; 1986.

COMO APRENDEN LAS PALABRAS LOS NIÑOS

THE ACQUISITION OF THE MEANING OF COLOR TERMS: A STUDY OF LEXICAL DEVELOPMENT. Elsa J. Bartlett en *Proceedings of the Stirling Conference on the Psychology of Language*, dirigido por P. Smith y R. Campbell. Plenum Press, 1977.

DICTIONARIES IN THE MIND. George A. Miller en *Language and Cognitive Processes*, vol. 1, n.° 3, págs. 171-185; Spring, 1986.

THE NATURE OF VOCABULARY ACQUISITION. Dirigido por Margaret G. McKeown y Mary E. Curtis. Lawrence Erlbaum Associates, 1987.

FIJACION BIOLOGICA DEL NITROGENO

SIMBIOSIS RHIZOBIUM-LEGUMINOSA. C. Azcón González de Aguilar, J. M. Barea y J. Olivares en *Investigación y Ciencia*, n.° 82, págs. 84-93, 1983.

MOLYBDENUM IN NITROGENASE. V. K. Shah, R. A. Ugalde, J. Imperial y W. J. Brill en *Annual Review Biochemistry*, 53: págs. 231-257; 1984.

NITROGEN FIXATION AND CO_2 METABOLISM. Dirigido por P. W. Ludden y J. R. Burris. Elsevier. 1985.

MECANISMO DE NODULACIÓN DE LAS LEGUMINOSAS. G. SOBERÓN en *Investigación y Ciencia*, n.° 106, págs 6-13; 1985.

NITROGEN FIXATION WITH NON-LEGUMES. Dirigido por F. A. Skinner y P. Uomala. Martinus Nijhoff Publishers. Dordrecht, 1986.

REGULATION OF NITROGEN FIXATION GENES. G. N. Gussin, C. W. Ronson y F. M. Ausubel en *Annual Review Genetics*, págs. 567-591; 1986.

JUEGOS DE ORDENADOR

THE EFFECTS OF PERSONAL SPACE AND TERRITORY ON HUMAN COMMUNICATION. E. T. Hall en *Nonverbal Communication in Human Interaction*, dirigido por Mark L. Knapp. Holt, Rinehart and Winston, 1978.

TALLER Y LABORATORIO

STABILITY OF FLUID INTERFACES OF REVOLUTION BETWEEN EQUAL SOLID CIRCULAR PLATES. R. D. Gillette y D. C. Dyson en *The Chemical Engineering Journal*, vol. 2, n.° 1, págs. 44-54; enero, 1971.

STABILITY AND OSCILLATIONS OF A SOAP FILM: AN ANALYTIC TREATMENT. Loyal Durand en *American Journal of Physics*; abril, 1981.

Número 134
Noviembre 1987

INVESTIGACION Y CIENCIA *Edición en español de* SCIENTIFIC AMERICAN

14 **DEFENSA ESTRATEGICA Y ARMAS DE ENERGIA DIRIGIDA, C. Kumar N. Patel y Nicolaas Bloembergen** Un grupo de expertos ha valorado la viabilidad de los nuevos armamentos.

22 **EL GRANDIOSO DESFILE DE LAS GALAXIAS, Alan Dressler**
La Vía Láctea avanza acompañada de un enjambre de galaxias. ¿Se dirige hacia un atractor?

32 **RETROTRANSCRIPCION, Harold Varmus**
La síntesis de ADN a partir de ARN parece darse incluso entre los organismos superiores.

44 **ELECTRUROS, James L. Dye**
Nueva clase de material cristalino dotado de propiedades ópticas y electrónicas singulares.

58 **MIMETISMO VEGETAL, Spencer C. H. Barrett**
Por selección natural, algunas plantas se confunden con insectos; otras parecen piedras.

68 **CORREDOR SWAHILI, Mark Horton**
En el siglo x, marinos de las costas africanas abrieron una ruta comerical hacia Europa.

80 **COMO APRENDEN LAS PALABRAS LOS NIÑOS, George Miller y Patricia Gildea**
A razón de 13 por día, extraen su significado de contextos que les resultan inteligibles.

88 **FIJACION BIOLOGICA DEL NITROGENO, Francisco Castillo y Jacobo Cárdenas**
Restringida a escasos microorganismos, resulta de extraordinaria importancia en agricultura.

4 AUTORES

8 HACE...

40 CIENCIA Y SOCIEDAD

98 JUEGOS DE ORDENADOR

104 TALLER Y LABORATORIO

108 LIBROS

112 BIBLIOGRAFIA

Los autores

C. KUMAR N. PATEL y NICOLAAS BLOEMBERGEN ("Defensa estratégica y armas de energía dirigida") copresidieron el grupo de expertos reunido por encargo de la Sociedad Americana de Física para evaluar la viabilidad de las armas de energía dirigida. Patel, que encabeza la división de asuntos físicos y académicos de los Laboratorios AT&T Bell, es oriundo de la India y cursó el primer ciclo de carrera en la Universidad de Poona, diplomándose en 1958. Es licenciado (1959) y doctor (1961) por la Universidad de Stanford. Al poco de su incorporación a los Laboratorios Bell, en 1961, inventó el láser de dióxido de carbono. Bloembergen, que ocupa la cátedra Gerhard Gade de la Universidad de Harvard, ganó el premio Nobel de física de 1981. Nacido en Holanda, se doctoró en 1948 por la Universidad estatal de Leiden. En 1951 fue nombrado profesor asociado de Harvard y, en 1974, recibió la Medalla Nacional estadounidense de Ciencias.

ALAN DRESSLER ("El grandioso desfile de las galaxias") es astrónomo de los observatorios de Las Campanas y del Monte Wilson, de la Institución Carnegie de Washington. Formado en la Universidad de California en Berkeley, se doctoró en astronomía y astrofísica por la de California en Santa Cruz. Tras cinco años de colaborar en los Observatorios Hale, accedió a una plaza de número. Dressler se ha especializado en la observación óptica de otras galaxias y le atraen particularmente la formación y evolución galácticas.

HAROLD VARMUS ("Retrotranscripción") se interesó por los virus tumorígenos de ARN (hoy denominados retrovirus) trabajando, a finales de la década de 1960, como clínico adjunto en los Institutos Nacionales estadounidenses de la Salud. Enseña virología molecular en la Universidad de California en San Francisco, en una plaza dotada por la Sociedad Americana del Cáncer, tras haber comenzado su carrera con una licenciatura (1962) en literatura inglesa, que cursó en el Amherst College y en la Universidad de Harvard. Aquel mismo año de 1962 inició sus estudios de medicina en la Universidad de Columbia, que concluyó en 1966, ingresando entonces en el Hospital Presbiteriano y de la Universidad de Columbia, de Nueva York, para realizar el internado. En 1968, Varmus se trasladó a los Institutos Nacionales de la Salud y, dos años después, a la Universidad de California en San Francisco.

JAMES L. DYE ("Electruros") dirige el departamento de química de la Universidad estatal de Michigan, en cuyo claustro docente se incorporó tras cursar el primer ciclo universitario en el Gustavus Adolphus College y licenciarse (1953) por la Universidad estatal de Iowa. En 1975 y 1976 disfrutó de una beca Guggenheim y otra Fulbright de investigación científica en la Universidad de Estrasburgo; asimismo, durante parte de 1982 y de 1983 colaboró, en un año sabático, con los Laboratorios Bell. Dye ha dirigido el Centro de Investigación de Materiales Fundamentales de la estatal de Michigan y es miembro de la Sociedad Americana de Química.

SPENCER C. H. BARRETT ("Mimetismo vegetal") es profesor asociado de la Universidad de Toronto. Se especializó en la evolución de los sistemas vegetales de fecundación y en la genética de las cizañas durante una expedición a Swazilandia, que realizó para licenciarse en botánica agrícola. Diplomado en ciencias en 1971 por la Universidad de Reading, dedicó un año a la recolección de semillas para un programa de conservación de los recursos genéticos auspiciado por la Royal Society de Londres. Se trasladó luego a la Universidad de California en Berkeley, que le recibió de doctor en 1977. Desde entonces, Barrett ha permanecido en Toronto.

MARK HORTON ("Corredor swahili") ha dirigido, desde 1980, numerosas expediciones a Shanga y Zanzíbar. Formado en la Universidad de Cambridge, por la que se doctoró en 1984, se dedica a la investigación en la Universidad de Oxford. Además de sus excavaciones africanas, financiadas por el Instituto Británico de Africa Oriental, Horton ha explorado yacimientos de Sri Lanka y América Central.

GEORGE A. MILLER y PATRICIA M. GILDEA ("Cómo aprenden las palabras los niños") empezaron a colaborar cuando Gildea trabajaba de postgraduada en la Universidad de Princeton. Actualmente, Miller ocupa la plaza de psicología James S. McDonnell, de Princeton, a cuyo claustro docente pertenece desde 1979. Tras cursar estudios en la Universidad de Alabama, se doctoró por la de Harvard en 1946. Trabajó como becario de investigación en el laboratorio psicoacústico de Harvard hasta 1948, cuando se le nombró profesor ayudante de psicología. Entre 1951 y 1955 enseñó en el Instituto de Tecnología de Massachusetts; en 1955 volvió a Harvard donde, junto con Jerome S. Bruner, fundó, en 1960, el Centro de Estudios Cognitivos. Miller se trasladó a la Universidad Rockefeller en 1968 y, a Princeton, 11 años después. Gildea colaboró en el "proyecto diccionario" durante sus trabajos de postdoctorado, realizados en 1984 en Bell Communications Research. En la actualidad enseña psicología en la Universidad Rutgers. Cursó la carrera en el Sarah Lawrence College y en Princeton y se interesó por el desarrollo del vocabulario durante la preparación de su tesis de doctorado, que defendió en Princeton en 1984. Se trasladó a Rutgers en 1985.

FRANCISCO CASTILLO y JACOBO CARDENAS ("Fijación biológica del nitrógeno") obtuvieron el grado de doctor en ciencias por la Universidad de Sevilla en los años 1975 y 1972, respectivamente. Desde el comienzo de su formación científica han trabajado en diversos aspectos del metabolismo del nitrógeno inorgánico, sobre todo por lo que respecta a la fijación de nitrógeno, tanto en centros universitarios españoles (Universidades de Sevilla y Córdoba) como de los Estados Unidos (Universidad de Purdue) y Alemania Federal (Universidad de Erlangen). En la actualidad desarrollan su labor docente e investigadora como catedráticos de bioquímica y biología molecular de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Córdoba, donde dirigen diversas líneas de investigación sobre el metabolismo del nitrógeno y el carbono en algas verdes y bacterias fototróficas.